

Simulation von Abfluss und Sedimenttransport bei Starkregenereignissen im Oberen Mittelrheintal

TEEMU HAGGE-KUBAT, ANSGAR WEHINGER & FRIEDER ENZMANN

Kurzfassung: Das Obere Mittelrheintal ist in den vergangenen Jahren mehrfach von Murgängen in Folge von Starkregenereignissen betroffen gewesen. Dadurch ereigneten sich immer wieder Zugunfälle mit weitreichenden Schäden. Es besteht daher ein Bedarf einer vorsorgenden Gefahrenanalyse, um weitere Sach- und ggf. auch Personenschäden nach Möglichkeit zu verhindern. Der hier vorgestellte Forschungsansatz hatte die Ausweisung unterschiedlicher Gefahrenzonen für Murenabgänge am Mittelrheintal zur Priorisierung ortsbezogener Vorsorgemaßnahmen zum Ziel. Weiter wurde die Wirksamkeit verschiedener Vorsorgemaßnahmen geprüft.

Zur Erreichung der genannten Ziele wurden numerische Simulationen des Abflussgeschehens und Sedimenttransports durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass mittels der Module `r.sim.water` und `r.sim.sediment` unter der Open Source-Software GRASS GIS die Abflussbedingungen am Beispiel eines konkreten Starkregenereignisses und dadurch ausgelöster Muren in den Simulationen plausibel nachgestellt werden konnten. Dafür war die Implementation von realen Landnutzungs- und Bodendaten in das Modell entscheidend. Die Anwendbarkeit der Programme konnte weiterhin durch verschiedene Vorwärtssimulationen gezeigt werden, bei denen wichtige Parameter der Abflussbildung, wie etwa die Landnutzung und die Topographie, markant verändert wurden. Durch eine Verschneidung der aus den Simulationen errechneten Werte mit einem nach TOGNACCA (1999) entwickelten Ansatz zur Ermittlung minimalkritischer Abflusswerte für die Entstehung eines Murgangs wurden gefährdete Bereiche für die Auslösung von Muren bei Starkregenereignissen im betrachteten Projektgebiet bestimmt. Diese decken sich mit den tatsächlichen Murgängen und können daher als plausibel eingeschätzt und für eine Gefährdungszonierung verwendet werden.

Abstract: In recent years, the Upper Middle Rhine Valley has been affected by several debris flow events as a result of heavy rainfall. As a result, several train accidents with far reaching damage occurred. Therefore there is a need for a precautionary hazard analysis in order to prevent further property damage and possibly personal injury. The here presented research approach is aimed to identify different danger zones for debris flows at the Middle Rhine Valley in order to prioritize location-based precautionary measures. The effectiveness of various preventive measures was also examined.

Numerical simulations of the runoff and sediment transport were carried out on an open source basis to achieve the stated goals. Using the modules `r.sim.water` and `r.sim.sediment` under GRASS GIS it was possible to plausibly simulate the runoff conditions that triggered of a real double mudflow event following a heavy rainfall. A crucial adaptation was the implementation of real land use and soil data into the model. The applicability of the programs could also be demonstrated by various forward simulations in which important parameters of runoff formation, such as topography, were significantly altered. By overlapping the values that were calculated using simulations with an approach developed according to TOGNACCA (1999) to determine minimally critical discharge values for the formation of a debris flow, endangered areas for the triggering of mudslides during heavy rain events in

the project area could be determined. These coincide with the position of the actual debris flows and can therefore be assessed as plausible and also shows to possibility to be used for hazard zoning.

1. Einleitung und Situation

Extreme Witterungsbedingungen wie etwa Starkniederschläge haben in den vergangenen Jahren in Rheinland-Pfalz zu erheblichen Schäden an Infrastruktur, Privatbesitz und menschlicher Gesundheit geführt. Eine besondere Gefahr entsteht dabei nicht nur durch den reinen Abfluss der Wassermassen, sondern auch durch die dadurch in Hanglagen ausgelösten gravitativen Massenbewegungen (TOGNACCA 1999). Solche hangabwärts gerichteten Massenverlagerungen treten am Mittelrheintal vermehrt auch in Form von Murgängen auf. Bei diesem Prozess wird ein Gemisch aus Lockergesteinsmaterial verschiedener Korngrößen aus den natürlich vorhandenen Gerinnen im Hang durch den Oberflächenabfluss ausgeräumt und lagert sich am Hangfuß ab. Ort und Ausmaß dieser Murgänge hängen insbesondere von der Niederschlagsintensität, den topographischen und geologischen Gegebenheiten wie etwa der Hangneigung, dem Vorhandensein von Lockergesteinsmassen sowie der Landnutzung ab. Aus den letzten Jahren sind diverse Schadensfälle bekannt, die besonders den Verkehr im Nadelöhr Mittelrheintal (zwei Bahnstrecken sowie Bundesstraßen B9 und B42) in erheblichem Maße betreffen und regelmäßig zu Zugentgleisungen und mehrtägigen Sperrungen der Rheinstrecke führten (ALBERTI et al. 2013).

In der inzwischen breit geführten Diskussion über Ursachen, Perspektiven und Gefahrenabwehrmöglichkeiten geht man mehrheitlich davon aus, dass durch anthropogene Eingriffe und Klimaveränderung mit einer Zunahme solcher Ereignisse zu rechnen ist (BECKER et al. 2016). Da diese Starkregen nach heutigem Stand jedoch nicht örtlich und zeitlich prognostizierbar sind, müssen sich vorbeugende Maßnahmen zunächst auf eine Gefährdungszonierung von einzelnen Hangbereichen konzentrieren. Daraus können dann angepasste Schutzmaßnahmen abgeleitet werden. Dazu gehört als wesentliches Instrument die Erarbeitung von lokalen Gefahrenkarten zum Thema Starkregen und Murgänge für das Obere Mittelrheintal. Dabei hat das Thema „Vorsorge gegen die Folgen von Starkregenereignissen“ eine enorme volkswirtschaftliche Bedeutung. So sollen beispielsweise allein im Jahr 2018 für die Landesfläche von Rheinland-Pfalz Schäden infolge Starkregen von 100 Millionen € entstanden sein (mündliche Mitteilung von Frau Dr. GOLL beim Workshop Starkregen am 23.11.2018 des Ministeriums für Umwelt Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz).

Die vorliegende Arbeit resultiert aus der Masterarbeit von HAGGE-KUBAT (2019), die am Geographischen Institut an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und in Kooperation mit dem Institut für Geowissenschaften und dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz entstanden ist. Diese Arbeit ist in das sogenannte MABEIS-Projekt am Institut für Geowissenschaften an der Universität Mainz eingebettet. Im Rahmen des MABEIS-Projekts (Massenbewegungs-Informationen-System) werden für die Landesfläche von Rheinland-Pfalz GIS-basierte Gefährdungskarten zum Thema Massenbewegungen entwickelt und getestet (ENZMANN 2019).

Die Autoren danken insbesondere Herrn Prof. Dr. ANDREAS VÖTT als Erstgutachter der Masterarbeit. Ebenso gilt der Dank den Herren Dr. ANDREAS BECKER und ELMAR WEIGL vom Deutschen Wetterdienst (DWD) sowie den Herren GOLDSCHMITT und Dr. DEHNER (Referat Boden im LGB) für die Bereitstellung von Wetter- bzw. Bodendaten.

2. Projektgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bundesland Rheinland-Pfalz im UNESCO-Welterbe Oberes Mittelrheintal. Die Auswahl des Projektgebietes ergab sich aus dem Forschungsansatz, wonach zwei reale Murenereignisse aus dem Jahr 2016 als Validierungsinstrument für die modellhafte Simulation dienen sollten. Im Detail liegt das Projektgebiet zwischen den Ortschaften Oberwessel im Norden und Bacharach im Süden gegenüber der Stadt Kaub auf der linksrheinischen Seite. Es hat eine Fläche von knapp 4 km² und zieht sich circa 2 km direkt am Rhein entlang. An dieser Stelle gibt es nur eine schmale Verebnung, auf der die Bahnstrecke und Bundesstraße 9 zwischen dem Ufer des Rheins und der aufragenden Felswand verlaufen. Das Projektgebiet wurde um die Täler der Ereignisse nahe des Ortes Henschhausen festgelegt. Insgesamt wurden vier größere Täler und deren Wassereinzugsgebiete analysiert (Abb. 1):

- (1) Nördliches Tal mit Murgang am 25.06.2016 (Abb. 2)
- (2) Südliches Tal mit Murgang am 25.06.2016 (Abb. 3)
- (3) Tal mit der Grube Rhein
- (4) Sogenanntes Referenztal (Abb. 4)

Die beiden Täler (1) und (2) sind diejenigen, in denen sich im Juni 2016 die beiden Murgänge ereigneten. Im Tal (3) befindet sich der Steinbruch der Grube Rhein. Im Süden des Projektgebietes schließt sich das Tal (4) an.

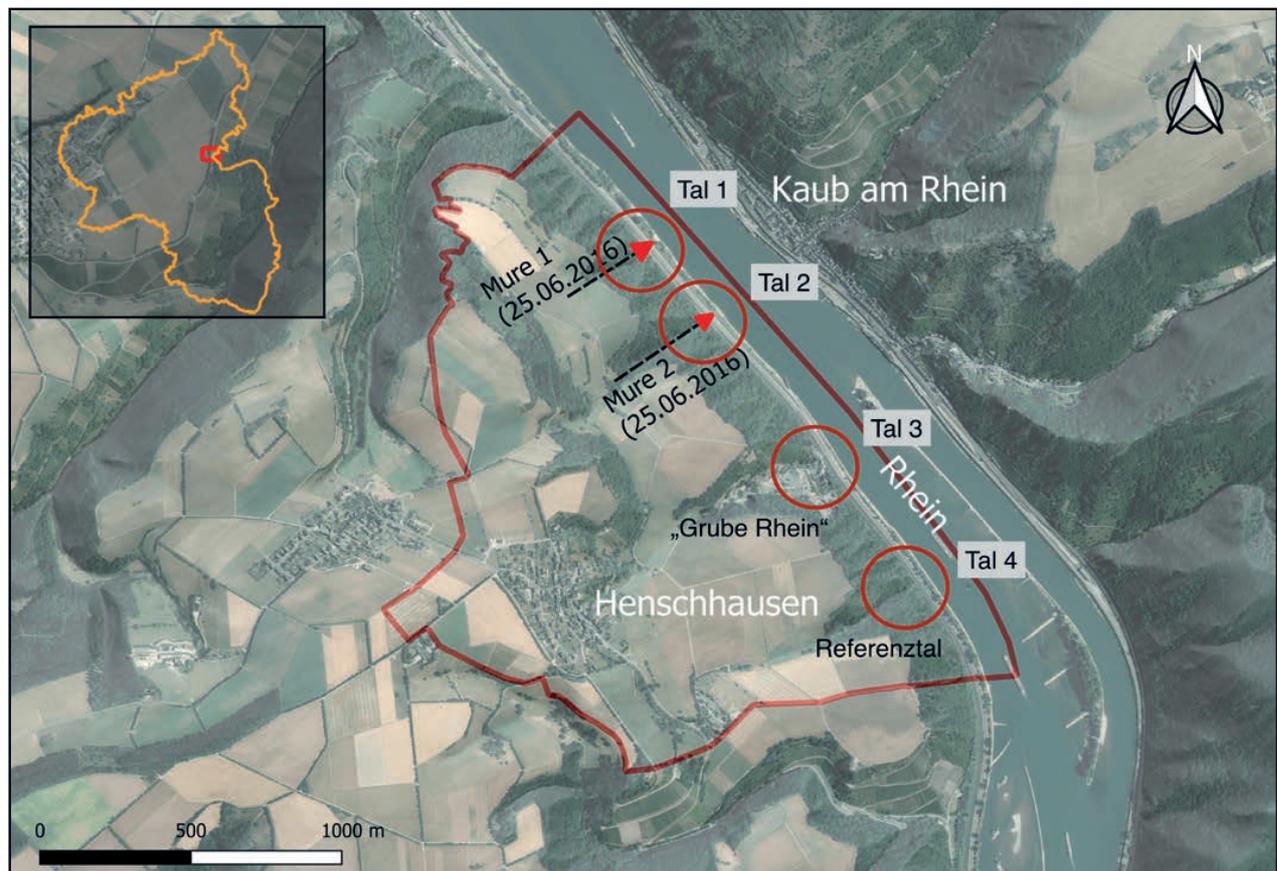


Abb. 1: Übersichtskarte über das Projektgebiet bei Henschhausen im Oberen Mittelrheintal. Die Karte zeigt die beiden Seitentäler des Rheins (1) und (2), in denen am 25.06.2016 jeweils ein Murgang eingetreten ist, sowie die Lage des Tälchens (3) mit der Grube Rhein sowie des sog. Referenztals (4) (Luftbild: LVERMGEO RHEINLAND-PFALZ 2018).



Abb. 2: (links): Tal (1) drei Tage nach dem Murgang. Das Murenmaterial ist bereits weitgehend beräumt. Hier ist ein Einlaufbauwerk zu einem Entwässerungskanal unter der Gleisanlage vorhanden (Foto: A. WEHINGER, 28.06.2016).
Abb. 3: (rechts): Tal (2) kurz nach dem Murgang. Das Murenental ist noch von starkem Abfluss betroffen. Der abgelagerte Schieferschutt des Murgangs liegt noch auf den Gleisen (Foto: H.-J. MATTHESIUS, 25.06.2016).



Abb. 4: Situation am Fuß des Tals (4). Hier haben sich breitflächig Erosionsmassen verteilt, die allerdings nicht bis zur Bahnstrecke und Bundesstraße reichten (Foto: A. WEHINGER, 28.06.2016).

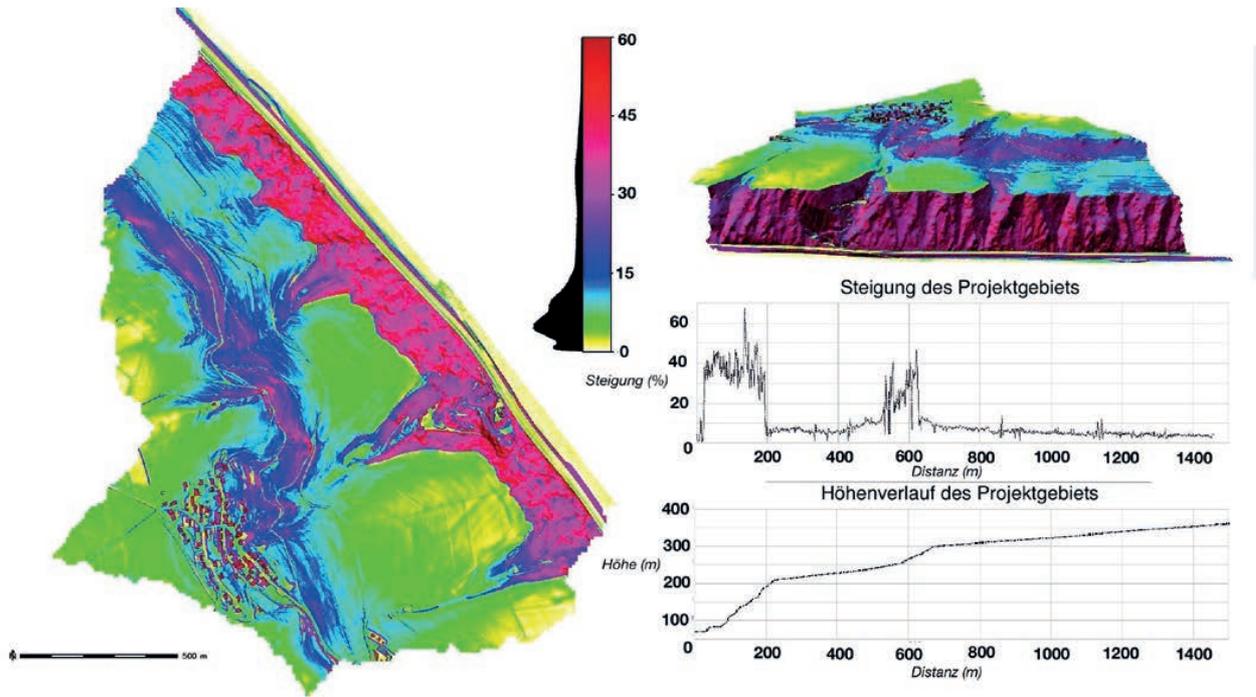


Abb. 5: Steigung und Höhenverlauf des Projektgebiets.

Wie in Abb. 5 deutlich zu erkennen ist, geht vom Rhein aufsteigend die Steillage auf Höhe von ca. 220 Metern unvermittelt in eine flachere Plateaulage über. Diese höher liegende Terrassenfläche mit einer Neigung von 0 - 20 Grad ist deutlich fruchtbarer als der Hangbereich. Hier sind Braunerden auf Löss-Substrat verbreitet, weshalb diese Bereiche landwirtschaftlich genutzt werden. Nach einer weiteren kleinen und deutlich weniger ausgeprägten Steillage schließt sich wiederum eine ebenere, landwirtschaftlich genutzte Fläche im Norden sowie der Ort Henschhausen im Süden an. Dieses Dorf ist der höchste Punkt im Projektgebiet auf einer Höhe von ca. 360 Metern. Das Projektgebiet endet in südwestlicher Richtung hinter dem Dorf.

Das entscheidende Kriterium für die präzise Eingrenzung des Projektgebietes war die Analyse der oberflächigen Wassereinzugsgebiete in diesem Bereich. Weitere größere Nebentäler konnten aufgrund softwareseitiger Limitierungen der verwendeten GRASS GIS-Module (vgl. Kap. 3) nicht berücksichtigt werden. Sie spielen aber für den hier relevanten Wasserabfluss in den Gerinnen der hauptentwässernden Täler keine Rolle.

3. Simulation von Abfluss und Sedimenttransport bei Starkregen

3.1 Simulationswerkzeuge

Simulation des Oberflächenabfluss

Die Durchführung der Simulationen sowie der digitalisierenden Vorarbeiten erfolgte mithilfe des als Open Source vorhandenen geographischen Informationssystems QGIS. Da das Relief und die Oberflächenbeschaffenheit ausschlaggebende Größen für die Berechnung von starkregeninduzierter Abflussbildung darstellen, war eine umfassende Geländeanalyse mit Hilfe eines GIS vor Beginn der Simulation unumgänglich. Die Hauptdatengrundlage stellt hierbei das digitale Geländemodell (DGM) auf LIDAR-Basis mit einer Auflösung von 1 x 1 Meter dar. Daraus wurden zunächst die genaue Topographie und entsprechend die Abflusswege mittels der zu-

grundlegenden Reliefenergie für mögliche Abflussbahnen identifiziert. Für die finalen Abflusssimulationen wurde das GRASS GIS-Modul „SIMWE Oberflächenabflussmodellierung (r.sim.water)“ von MITASOVA et al. (2004) verwendet.

Unterschiedliche Modelltypen basieren bei der Berechnung des Abflusses auf leicht unterschiedlichen mathematischen und physikalischen Ansätzen. So kommt beispielsweise der Ansatz der „kinematischen Welle“ von SAGA im Modul „Overland Flow – Kinematic Wave D8“ zum Einsatz. Hierbei erfolgt eine vereinfachte Beschreibung des Fließvorgangs, in welchem die Saint Venant'schen Flachwassergleichungen als Ableitung der Navier-Stokes-Gleichung zu einem Gleichgewicht zwischen Reibung und Schwerkraft vereinfacht werden. Diese besteht aus der Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

wobei Q den Durchfluss, A den durchflossenen Fließquerschnitt, s die Weglänge und t die Zeiteinheit darstellen, und der Energiegleichung:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial s} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial s} + g \cdot (J_s + J_v) = 0 \quad (2)$$

Dabei ist v die Fließgeschwindigkeit, g die Erdbeschleunigung, h die Wasserhöhe, J_s das Sohlgefälle und J_v das Reibungsgefälle. Die Glieder $(\partial v/\partial t)$ und $v \cdot (\partial v/\partial s)$ beschreiben die lokale und die konvektive Beschleunigung (Trägheitsglieder), der Term $g \cdot (\partial h/\partial s)$ das Druckglied (Erhardt 2007).

Erweiternd dazu werden die Flachwassergleichungen zur Berechnung der Abflussbahnen und Wassertiefen im Modul r.sim.water auf GRASS GIS durch den Ansatz der diffusen Welle ergänzt. Das Modell r.sim.water, beruht auf dem physikalisch basierten distributiven Modell SIMWE (SIMulated Water Erosion) von MITASOVA et al. (2004). Dieses wurde mit dem Ziel entwickelt, Erosionsprozesse durch Oberflächenabfluss zu modellieren (MITASOVA & MITAS et al. 2001). Der Abfluss wird dabei als dünner Wasserfilm auf Basis der oben beschriebenen Flachwassergleichungen nach Saint Venant berechnet. Hierbei kann im Gegensatz zur reinen kinematischen Welle der Druckterm der Impulsgleichung durch die Green's function Monte-Carlo Methode berücksichtigt und berechnet werden.

Für die Ermittlung der Landnutzungsdaten standen neben dem ATKIS-Datensatz Rheinland-Pfalz für diese Arbeit aktuelle und hochgenaue Luftbilder des Landesamts für Vermessung und Geoinformationen zur Verfügung. Die Bodendaten des Landesamtes für Geologie und Bergbau sowie eigene Geländeuntersuchungen dienten der Abschätzung der Rauheitswerte nach MANNING-STRICKLER sowie der Abschätzung der Infiltrationskapazität. Jeder Landnutzungsart wurde daraufhin ein passender Rauheitswert nach MANNING-STRICKLER mithilfe von Tabellen unter anderem aus HOFIERKA & KNUTOVA (2015), PHILLIPS & TADAYON (2006) und MANIAK (2010) zugeordnet. Ein schematischer Ablauf einer solchen Simulation ist in Abbildung 6 dargestellt.

Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass eine solche Simulation immer nur eine Annäherung an die Wirklichkeit darstellen kann. Somit ist auch die Zuordnung der Rauheitswerte nach

MANNING-STRICKLER, welche auch von jahreszeitlichen Schwankungen der Vegetation oder der Bearbeitung von Ackerflächen abhängig ist, kein fest definierter Wert und kann sich im Jahresverlauf ändern. Somit können diese Werte im Rahmen dieser Arbeit nur als eine validierte Abschätzung verstanden werden.

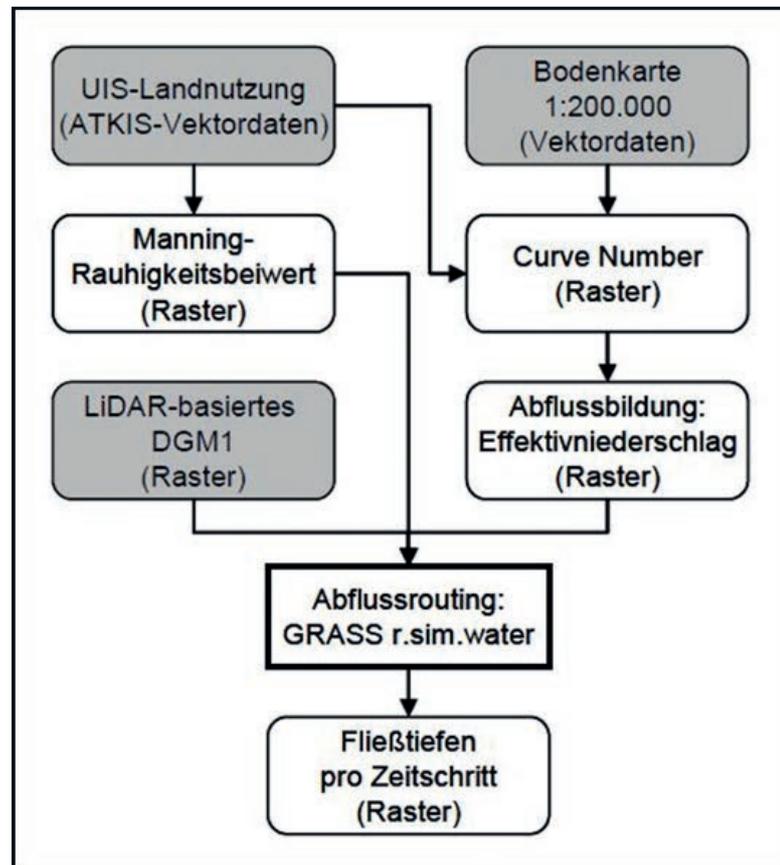


Abb. 6: Schematischer Ablauf einer Oberflächenabflusssimulation mit dem Modul r.sim.water unter GRASS GIS (TYRNA & HOCHSCHILD 2010). Im Unterschied zur genannten Literatur wurden im hier vorgestellten Projekt die Daten der Bodenkarte 1 : 50.000 verwendet.

Simulation des Sedimenttransports

Neben der Simulation des Abflusses und der Wassertiefe gibt es in GRASS GIS noch ein weiteres Modul, welches aus der Simulation des Abflusses und der Wassertiefe den Sedimentfluss sowie Bodenerosion und Sedimentation simulieren kann. Es gilt der Grundsatz, dass Bodenmaterial, welches von Regentropfen oder der Scherkraft des Überlandflusses gelöst und transportiert wird, so lange in Bewegung bleibt, bis die Transportkapazität verringert und das Material an dieser Stelle sedimentiert wird (HAAN et al. 1994). Bei der Erstellung einer Gleichung für den Sedimenttransport spielen die Parameter der Transportkapazität und Lösungskapazität des Bodens eine maßgebliche Rolle.

Die Sedimenttransportkapazität T_c (Transport capacity) und die Ablösungskapazität D_c (Detachment capacity) repräsentieren hierbei die maximale potentielle Sedimentflussrate bzw. die maximale potentielle Ablösungsrate. Daraus leitet sich die Sedimentkontinuitätsgleichung ab, die allgemein die Änderung der Sedimentlagerung unter Zuhilfenahme der beschriebenen Parameter im Laufe der Zeit und die Änderung der Sedimentflussrate entlang des 3D-Reliefs von den effektiven Quellen zu den Senken angibt (MITSOVA et al. 2013).

Dadurch kann eine Gleichung beschrieben werden, nach der das Modul „r.sim.sediment“ den Sedimenttransport durch Oberflächenabfluss berechnet:

$$q_s = K \cdot q^m \cdot S^n \quad (3)$$

Hierbei berechnet das Programm den Sedimenttransport (q_s) als Formel des Niederschlages, der Boden- und Landnutzungsparameter (K ; hierbei sind K_t , K_d und τ gemeint), des Oberflächenabflusses (q), des Neigungswinkels (S) und den empirischen Parametern der Oberflächenrauigkeit und des Reliefs (m, n) (MITSOVA et al. 2013).

Simulation des minimal kritischen Oberflächenabflusses

Um anschließend aus den simulierten Abfluss- und Sedimenttransportwerten eine Aussage darüber treffen zu können, inwieweit eine tatsächliche, berechenbare Gefahr für das Auftreten eines Murgangs für die untersuchten Täler besteht, ist zunächst ein Blick in die Wirkungsweise von Prognosewerkzeugen für Murgänge nötig. Mit empirischen oder semi-empirischen Modellen haben eine Reihe von Forschern (u.a. KEEFER et al. 1987, KIRNBAUER 2002, GRAF et al. 2013) in der Vergangenheit bereits versucht, Korrelationen zwischen Niederschlagsintensität, dem entsprechenden Oberflächenabfluss und Sedimenttransport einerseits sowie dem Auftreten von Murgängen andererseits, aufzustellen. Ziel dieser Systeme und Simulationen ist es vor allem, die Vorhersage von Murgängen und daraus resultierend die Wirksamkeit von Warn- und Schutzsystemen zu verbessern. In einigen Fällen kamen in alpinem Terrain solche Systeme schon mit Erfolg zum Einsatz (z.B. STAFFLER et al. 2008). All diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie für den Einzelfall eine Murengefährdung recht gut analysieren können, ihre Berechnungen jedoch nur lokale Gültigkeit besitzen. Das liegt daran, dass die kritischen Niederschläge und die topographischen Gegebenheiten, die für das Auftreten von Murgängen entscheidend sind, gebiets-spezifische Größen sind. Diese lassen sich nicht ohne Weiteres auf andere Regionen übertragen. Solche regionalen Parameter müssen sogar teilweise für bereits analysierte Bereiche mit der Zeit neu definiert und an veränderte Bedingungen in den Auslösegebieten angepasst werden (TAKAHASHI 1981). Die Langzeitdisposition eines Auslösegebietes kann sich dabei zudem sogar so stark ändern, dass sich auch die Schwellenwerte für das Auftreten von Murgängen mit der Zeit markant verändern (TOGNACCA 1999). Daher ist es nicht zielführend, eine Murengefahr in einem noch nicht präzise analysierten Gebiet zu definieren beziehungsweise diese von einem Gebiet auf ein anderes hochzurechnen. Es bedarf für die genaue Analyse der Kenntnis oder zumindest der validierten Abschätzung der relevanten Parameter. Dann ist es theoretisch möglich aus den analysierten räumlichen Gegebenheiten, dem simulierten Abflussverhalten und den Gesteins- und Bodenparametern die Murengefahr für ein untersuchtes Projektgebiet beispielsweise nach dem Ansatz von TOGNACCA (1999) zu definieren.

Dieser fand im Rahmen seiner Dissertation an der ETH Zürich bei Versuchen mit einem neigbaren Versuchskanal für idealisierte Muren unter anderem heraus, dass ein Murgang hauptsächlich infolge progressiver Erosion durch die Destabilisierung der Lockermaterialschicht durch einen starken Oberflächenabfluss entsteht (TOGNACCA 1999). Daher entwickelte er für die Festlegung eines Entstehungskriteriums für Murgänge den Ansatz von WHITTAKER & JÄGGI (1986) weiter, der für die Beschreibung der Stabilität von Deckschichten entwickelt wurde. Dieser Ansatz hat folgende allgemeine Formel:

$$q_{DC} = q_{SW} - q_h = g^{0.5} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{0.5} \cdot \frac{d_m^{1.5}}{\tan \theta^{1.17}} \quad (4)$$

Dabei ist q_{DC} der spezifische kritische Oberflächenabfluss, welcher für die Auslösung eines Murgangs minimal erforderlich ist. q_{SW} ist dieser spezifische Oberflächenabfluss, q_h die Infiltrationskapazität der obersten Lockermaterialschicht, g ist die Gravitationskonstante, ρ_s und ρ_w sind die Werte für die Dichte des Gesteins und des Wassers und d_m ein charakteristischer Schuttdurchmesser, welcher im betreffenden Liefergebiet anzutreffen ist. $\tan \Theta$ stellt den Winkel des Gefälles in Grad dar (TOGNACCA 1999). Der nach dieser Formel berechnete Wert ist für jedes einzelne Gerinne zu berechnen.

Wenn also ein gegebener Oberflächenabfluss diesen berechneten Grenzwert q_{DC} an der Lockergesteinsschicht überschreitet, dann ist die Entstehung eines Murgangs möglich. Wird der effektive kritische Oberflächenabfluss für die Murgangsentstehung hierbei unterschritten, aber gleichzeitig der kritische Abfluss für die Destabilisierung einer Deckschicht überschritten, dann kann ein Geschiebetrieb auftreten. Ist dagegen der Oberflächenabfluss noch kleiner als der kritische Abfluss für die Destabilisierung des Deckwerkes, tritt auch keine Erosion auf (TOGNACCA 1999). Diese Formel wurde mit Erfolg an verschiedenen, gut dokumentierten Murgängen validiert und wird hier als Kontrollgröße für die Bestimmung der Murengefahr in den Projektgebieten genutzt.

3.2 Starkregenereignis am 25.06.2016

Zwischen Oberwesel und Bacharach ereigneten sich in Folge einer in kurzen Abständen auftretenden Gewitterfolge am 25.06.2016 die beiden Murgänge in den Tälern (1) und (2). Diese Ereignisse sind in den beschriebenen nördlichen Hangtälern des Projektgebietes Henschhausen lokalisiert und wurden in zeitlich kurzem Abstand zueinander ausgelöst.



Abb. 7: Entgleister Zug in Folge eines starkregeninduzierten Murgangs am 25.06.2016 bei Bacharach (Foto: R. KIRCHHOFF, 25.06.2016).

Die Wetterlage stellt an diesem Tag insofern eine Besonderheit dar, als dass über mehrere Stunden verteilt vier markante konvektive Gewitterzellen mit erheblichen Niederschlagsmengen über das Gebiet hinwegzogen.

Aus den RADOLAN-Daten des DWD (5 Minuten-Daten) ist zu erkennen, dass die dritte Gewitterzelle den mit Abstand stärksten Niederschlag mit insgesamt ca. 55 mm/m² mit sich brachte. Es ist davon auszugehen, dass in Kombination mit dem durch die beiden vorherigen Niederschlagsereignisse gesättigten Boden kaum noch Wasser infiltriert werden konnte, sodass vermutlich nahezu das gesamte Niederschlagswasser als Oberflächenabfluss anzusehen ist. Die anströmenden Wassermassen rissen große Mengen von Lockergestein mit und lagerten sie als Schuttkegel auf den unterhalb der Täler liegenden Bahngleisen und der Bundesstraße 9 ab. Dieser Schieferschutt ist als Erosionsmaterial in den Steillagen und vor allem den Gerinnen des Mittelrheintals in großen Mengen vorhanden. In Folge dieser Murgänge kam es am Morgen des 25. Juni 2016 zur Entgleisung eines fahrenden Zuges beim Tal (1) (Abb. 7).

3.3 Ergebnisse der Abflusssimulationen

In dieser Studie wurden verschiedene Simulationen mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen durchgeführt:

- (1) Abflusssimulation für den tatsächlich aufgetretenen Starkregen auf Basis der meteorologischen Daten und der Topographie (digitales Geländemodell).
- (2) Abflusssimulation wie zuvor, jedoch zusätzlich mit Implementation von Landnutzungs- und Bodendaten im Projektgebiet. Weiter wurde ein differenzierter Niederschlagsüberschuss berücksichtigt, der aus den DWD-Wetterdaten und den abgeschätzten Bodenverhältnissen der betreffenden Stunden abgeleitet wurde.

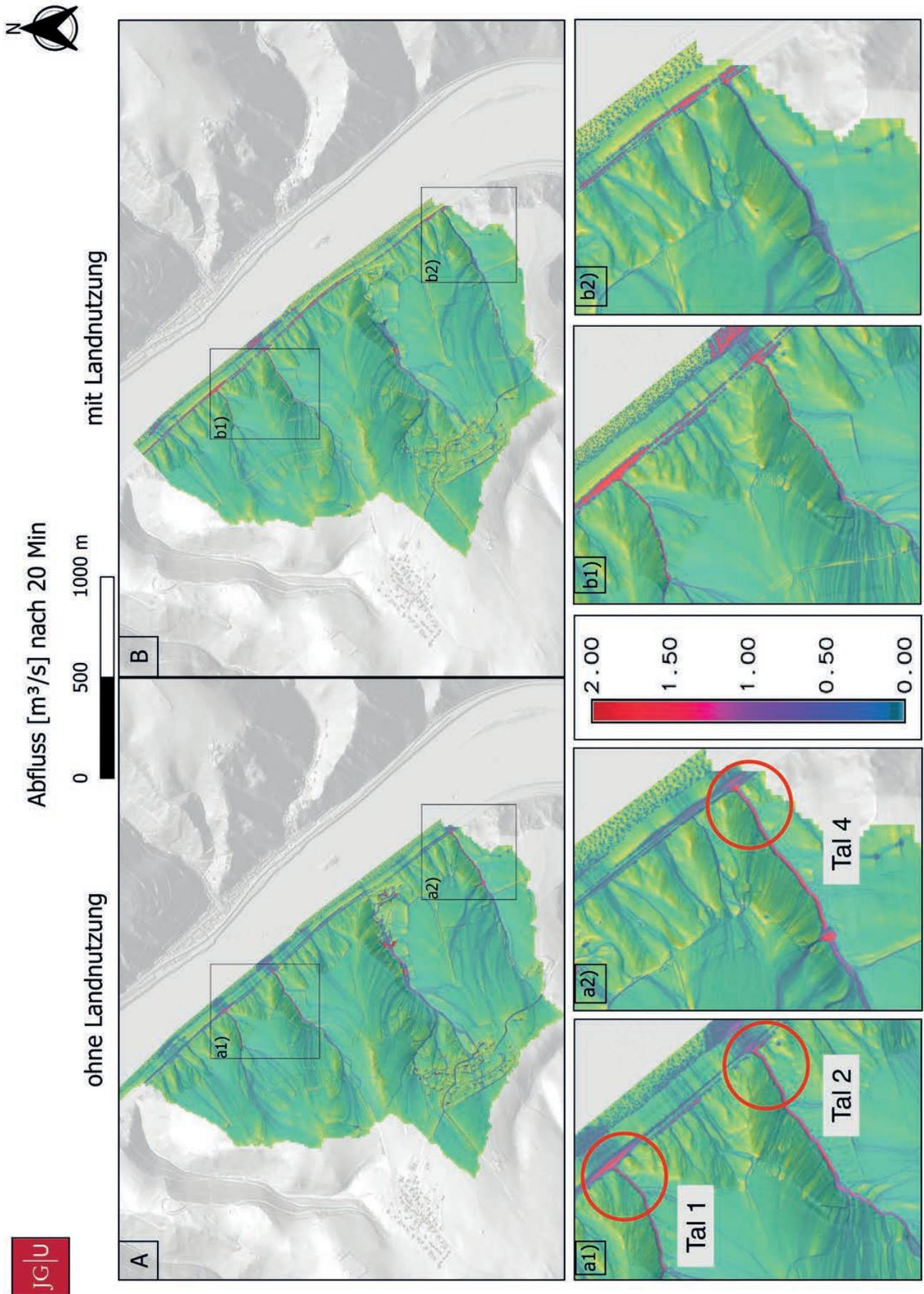
Die Simulation des Oberflächenabflusses erfolgte für einen Starkniederschlag von 20 Minuten Dauer. Für die betrachteten Täler ergeben sich folgende Ergebnisse (Abb. 8):

Tal (1) und (2): Im Falle der beiden Täler, in den tatsächlich Murgänge aufgetreten sind, ergibt sich bei Berücksichtigung der Landnutzung ein markant höherer Abfluss.

Tal (3): Für das Tal (3) der „Grube Rhein“ ist die Ausbreitung des Wassers in der Simulation mit implementierter Land- und Bodennutzung durch die Kenntnis und Berücksichtigung eines vorhandenen Drainagesystems in großem Maße zurückgegangen, sodass innerhalb des Tagebaugeländes im Vergleich zur Simulation ohne Landnutzung keine Stellen mit erhöhtem Abfluss identifiziert werden können. Das entspricht der realen Situation am Ereignistag, an dem sich keine nennenswerteren Schäden im Bereich des Tals (3) feststellen ließen.

Tal (4): Beim Referenztal (4) verringert sich der Abfluss bei Berücksichtigung der Landnutzung. Tatsächlich ist hier kein Murgang aufgetreten.

Abb. 8 (rechte Seite): Vergleich der Abflusssimulation in [m³/s] (farbige Skala) nach 20 Minuten ohne Land- und Bodennutzung (Bild A) und mit Land- und Bodennutzung (Bild B) mit Vergrößerung der verschiedenen Talsysteme: Täler (1) und (2) sind in den Bildern a1) und b1) vergrößert dargestellt und zeigen in den rot eingefärbten Bereichen den höheren Abfluss ohne Berücksichtigung der Landnutzung. Tal (4) ist in den Vergrößerungen a2) und b2) dargestellt. Im Unterschied zu den Tälern (1) und (2) ergibt sich beim Tal (4) mit Berücksichtigung der Landnutzung ein geringerer Abfluss.



Die Variante der Simulation des Oberflächenwasserabflusses mit Berücksichtigung der Landnutzung und Bodenverhältnisse kommt im Vergleich zu den Berechnungen ohne diesen Einfluss zu deutlich realitätsnäheren und präziseren Berechnungen. Somit konnten die Folgen des Starkregenereignisses vom 25.06.2016 plausibel simuliert werden. Die Abbildung 9 zeigt das Projektgebiet noch einmal in der 3D-Perspektive mit Sicht aus Norden.

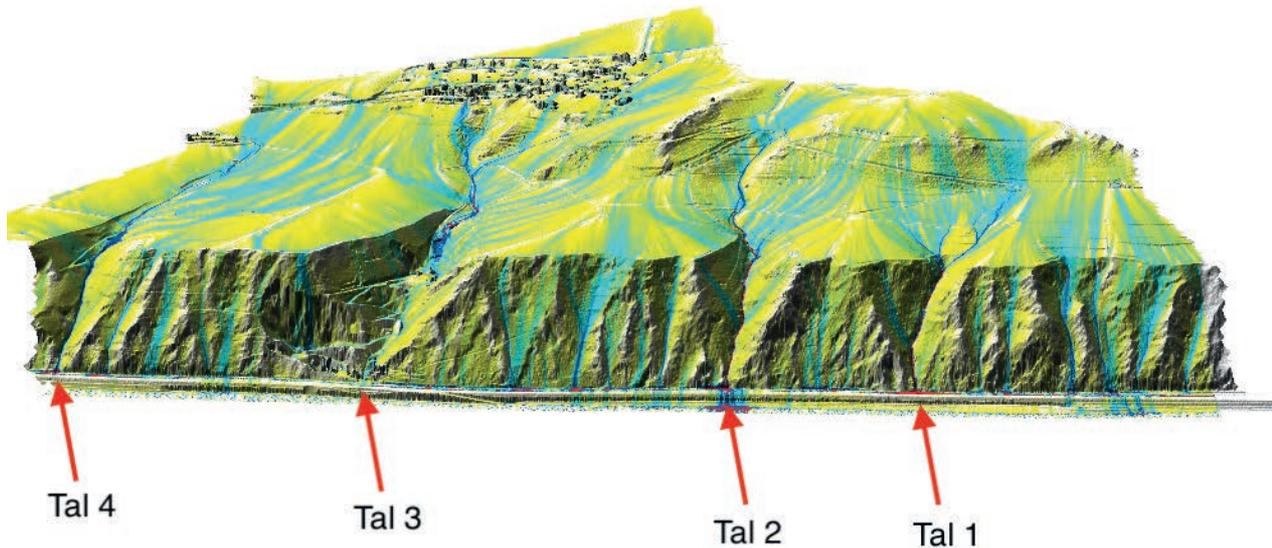


Abb. 9: 3D-Ansicht des Abflusses aus nördlicher Perspektive nach 20 Minuten mit integrierter Land- und Bodennutzung.

3.4 Simulation des Sedimenttransports

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die Simulation der Sedimentbewegung. Der Sedimenttransport hängt in entscheidendem Maße von der Intensität des oberflächigen Abflusses ab. Dementsprechend wird auch hierbei der mit Abstand größte Sedimenttransport realitätsgerecht innerhalb der beiden Ereignistäler simuliert, wohingegen im Referenztal nach Implementation der Landnutzung und Bodendaten im Modell deutlich weniger Sedimenttransport berechnet wird (Abb. 10). Während auf der Hochfläche bereits nach 5 simulierten Minuten in den Einzugsgebieten der beiden Ereignistäler (1 und 2) deutlicher Sedimenttransport (rechnerisch) auftritt, findet zu diesem Zeitpunkt im Einzugsgebiet des Referenztals (4) deutlich weniger Sedimenttransport statt. Das Wertespektrum liegt für die Hochfläche im Bereich von wenigen Gramm transportierten Materials bis hin zu knapp 500 Gramm pro Millisekunde in den direkten Zuläufen zu den Ereignisgerinnen in der Steillage. Diese Werte sind vermutlich durch die hohe Ablösungskapazität der feinkörnigen landwirtschaftlich genutzten Böden in den Einzugsgebieten bedingt, erscheinen vor dem Hintergrund der sehr hohen Niederschlagsmenge aber plausibel. Die abtragende Wirkung des Abflusses wird im Steilhang durch das bereits aus der Hochfläche mitgeführte Material vermutlich so verstärkt, dass dieser Abfluss wiederum durch die dadurch erhöhte kinetische Energie weitere große Gesteinsfragmente ablösen kann.

In den folgenden Simulationszeitschritten (20 simulierte Minuten; Abb. 10) erhöht sich zwar auch im Referenztal (4) die Menge an bewegtem Sediment, die Werte bleiben aber deutlich unter den Werten, welche in den beiden Ereignistälern (1) und (2) berechnet werden. Auffällig ist in beiden Simulationsschritten ein schmaler Streifen mit sehr geringem Sedimentfluss über den Ereignistälern auf der Hochfläche (in Abb. 10 in der Vergrößerung a1 zu erkennen). Dieser Bereich ist laut der Landnutzungskarte ein Waldstück. Dieses verhält sich in der Simulation ähnlich wie ein Sedimentfang, durch den ankommendes Material gestoppt wird, bei dem selbst aber kaum Sediment gelöst wird.

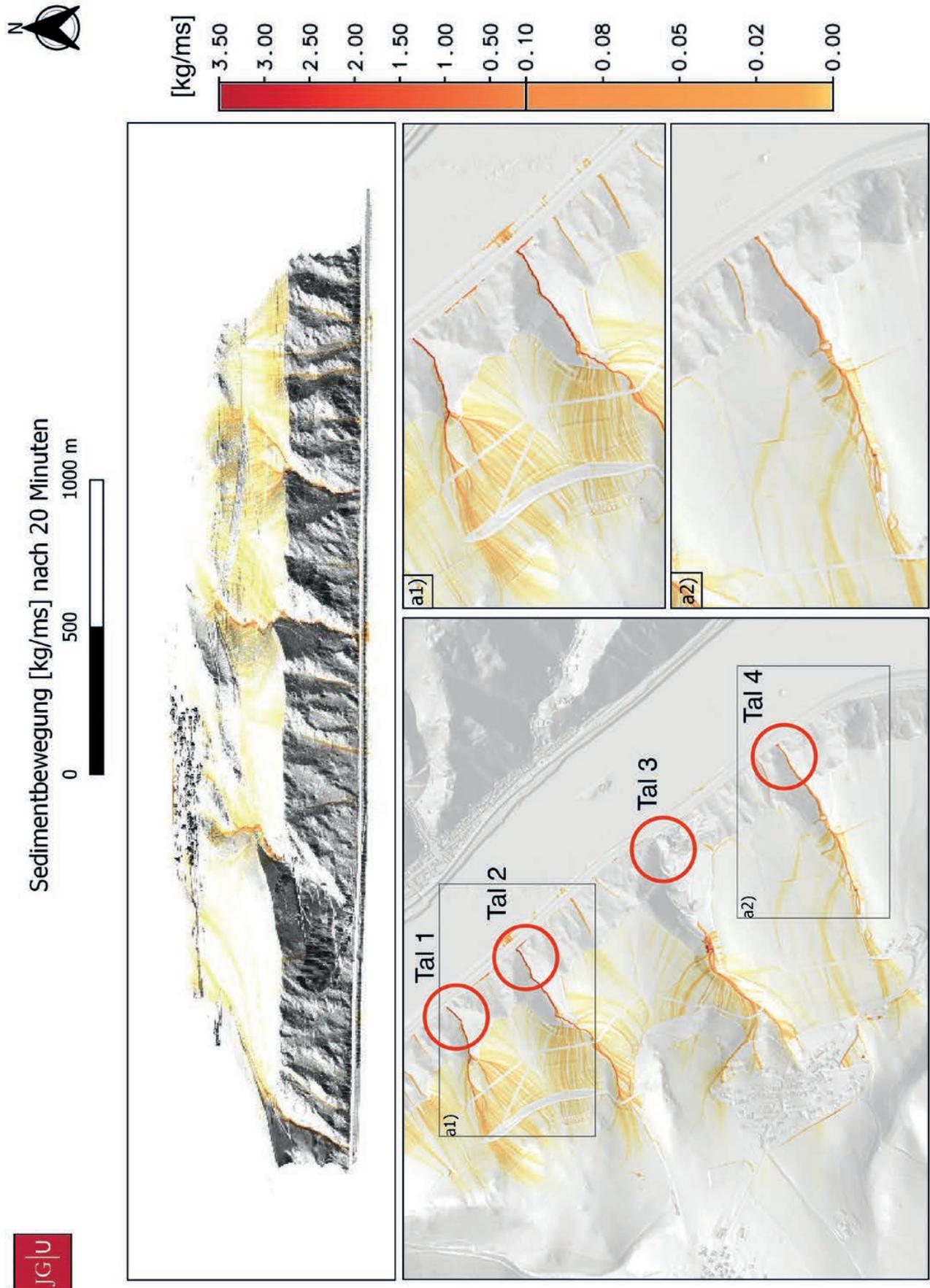


Abb. 10: Sedimenttransport nach 20 simulierten Minuten mit Implementation der Land- und Bodennutzung. Die Täler 1 und 2 sind in Bild a1) und Tal 4 in Bild a2) vergrößert dargestellt.

Insgesamt betrachtet korreliert die Berechnung des Sedimenttransportes im Projektgebiet Henschhausen in hohem Maße mit den tatsächlichen Gegebenheiten, welche nach dem Ereignis am 25.06.2016 vorgefunden wurden (vgl. Abb. 2, 3 und 4). Die Begutachtung der in den Stunden und Tagen nach den Murgängen dort dokumentierten Erosionsspuren legt nahe, dass der Hauptanteil des während der Sturzflut mobilisierten Materials auf Bachbetterosion in Folge von progressiver Sohlerosion in der Steillage zurückzuführen ist.

3.5 Simulation des minimal kritischen Oberflächenabfluss

Um nun zu überprüfen, ob die Anwendung der in Kapitel 3.1 von TOGNACCA (1999) aufgestellten Formel zu vergleichbaren Ergebnissen wie die in dieser Studie erarbeiteten Simulationsergebnisse führt, wurden alle hier relevanten Täler entsprechend der vorgestellten Formel durchgerechnet.

Dieser Berechnungsansatz stellt also den Versuch dar, die simulierten Abflusswerte aus den Tälern mit der möglichen Murengefahr, welche sich aus der Berechnung der Formel ergibt, zu verschneiden, um daraus für die jeweils betreffenden Gerinne ein Murgangspotenzial bei einem gegebenen Starkregen abzuleiten. Dies ist möglich, da beide Ansätze einen Abflusswert berechnen, welcher in der Maßeinheit m^3/s angegeben ist.

Die Eingangswerte wie die Gravitationskonstante oder die Dichte des vorherrschenden Gesteins, welche für die Berechnung der Formel von TOGNACCA (1999) essentiell sind, wurden aus der Literatur (u.a. TOGNACCA (1999), TAKAHASHI (1981)) entnommen oder aufgrund der Feldbegehungen und Fotos der Murgänge geschätzt. Als simulierter Abflusswert für das einzelne Gerinne wurde für jedes betreffende Tal pro Projektgebiet ein Durchschnittswert für den Abfluss aus den Rasterkarten der Simulationen nach 20 simulierten Minuten berechnet. Dieser Wert wurde mit dem berechneten minimal kritischen Wert für die Entstehung eines Murgangs durch progressive Erosion für das betreffende Gerinne verglichen.

Abb. 11 präsentiert diesen Vergleich in graphischer Form. Dabei stellt die orange Linie den minimalen Oberflächenzufluss dar, der für die Entstehung eines Murgangs in den betreffenden Tälern rechnerisch nötig ist. Es zeigt sich eine prinzipielle Übereinstimmung der beiden Ansätze. Die Werte, welche gebietsspezifisch berechnet wurden, liegen im Vergleich mit den simulierten Werten der „realitätsnäheren“ Simulation mit Landnutzung, in einem annähernd passenden Verhältnis. So werden für die Täler (1) und (2) die nach TOGNACCA (1999) berechneten minimalen Abflusswerte für die Entstehung von Murgängen in diesen Simulationen übertroffen, während im Referenztal (4) diese unterschritten werden. Dies spiegelt die tatsächliche Situation während der Ereignisse am 25.06.2016 wider und bestätigt die Anwendbarkeit der hier durchgeführten Simulation.

Demgegenüber ergibt die Simulation ohne Landnutzung im Vergleich zu den berechneten Werten nach der Formel von TOGNACCA (1999) andere Ergebnisse. Hierbei werden die Gerinne nicht den realen Auswirkungen entsprechend modelliert, sodass beispielsweise im Referenztal (4) der kritische Wert überschritten und im Ereignistal (1) unterschritten wird.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass einige Parameter bei Simulation nur valide geschätzt werden konnten, so dass die Ergebnisse unvermeidbare Unschärfen enthalten. Dies ist bei allen weiteren Analysen, die auf den beschriebenen Analysen aufbauen, zu berücksichtigen (s. u.).

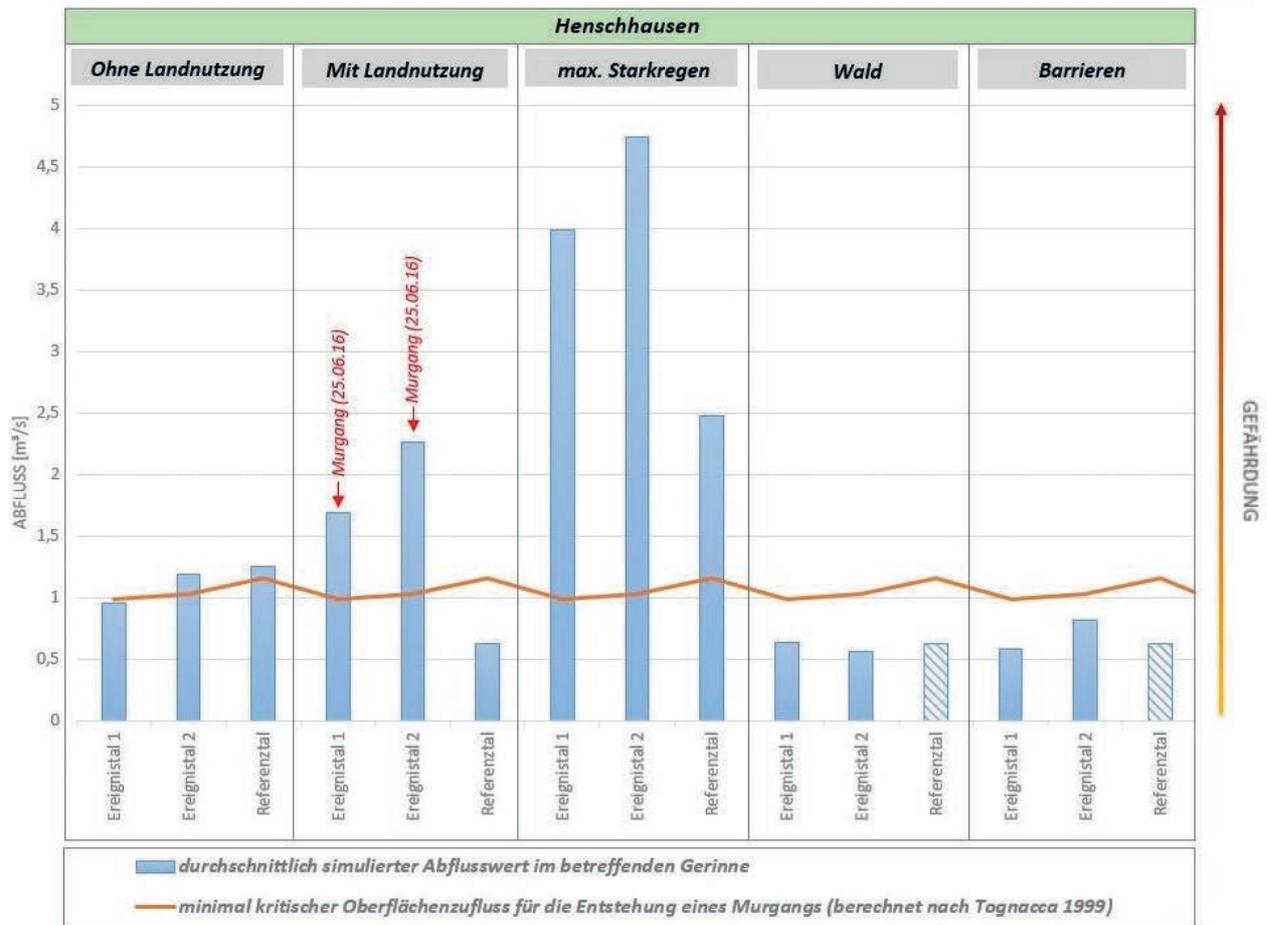


Abb. 11: Vergleich der verschiedenen Simulationen mit dem minimal kritischen Oberflächenzufluss nach TOGNACCA (1999) für die Entstehung eines Murgangs.

3.6 Vorwärtssimulationen

3.6.1 Vorbemerkungen

Nachdem die im Jahr 2016 aufgetretenen Murgänge plausibel simuliert wurden, wurden nun die Auswirkungen bei Veränderung einzelner Parameter auf das Abflussgeschehen und damit auf die Gefahr der Entstehung von Murgängen geprüft. Motivation hierfür ist, für durch Murgänge gefährdete Flächen mögliche Vorsorgemaßnahmen zu prüfen bzw. zu entwickeln.

Für die Vorwärtssimulation wurde jeweils ein Parameter verändert, während die anderen Werte konstant blieben, um so die Effekte der einzelnen Veränderungen genau zuordnen zu können. Konkret wurden die Werte für die Niederschlagsmenge, für die Landnutzung sowie die Geländetopographie als Eingriffe variiert.

3.6.2 Variation der Niederschlagsmenge

Für den Parameter Niederschlagsmenge wurde auch der Extremwert, der bei einem Starkregenereignis im Jahr 2014 in Münster gemessen wurde, in Ansatz gebracht. Hierbei zeigte die Simulationsrechnung, dass bei einem deutlich erhöhten Eingangsniederschlag, also einer markanten Verstärkung des Starkregens, auch Gebiete im Projektgebiet von sehr starkem Abfluss betroffen sind, die in den vorherigen Simulationen noch nicht in dem Maße betroffen waren (Abb. 12).

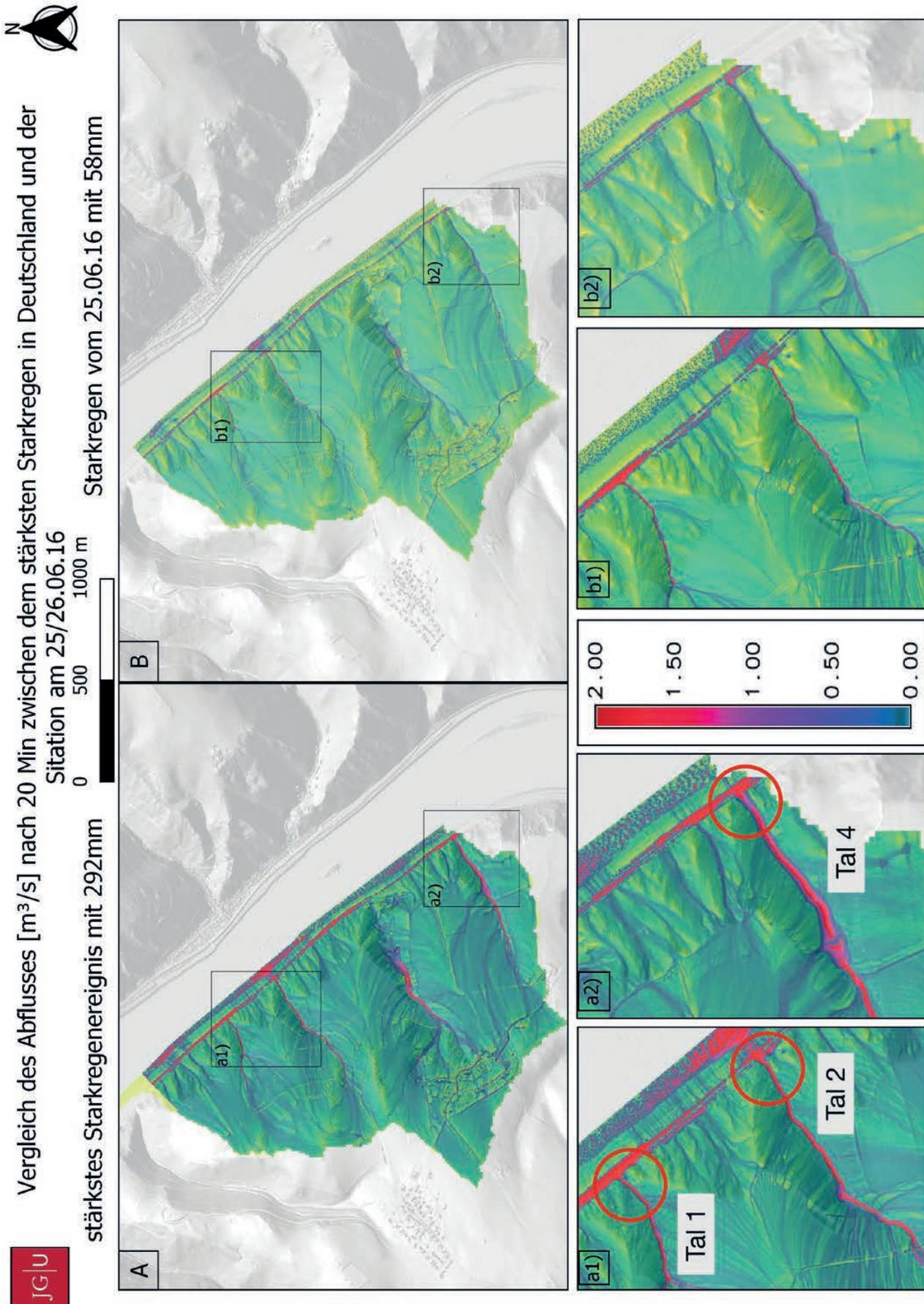


Abb. 12: Vergleich des Abflusses [m^3/s] bei unterschiedlichen Niederschlagsmengen. In A wird der Abfluss entsprechend dem Ereignis im Jahr 2014 in Münster und in B der Abfluss entsprechend dem tatsächlichen Starkregen vom 25.06.2016 simuliert. Vergrößerungen sind für die Täler 1 und 2 (a1) und b1)) und Tal 4 (a2, b2) dargestellt.



Abb. 13: Außerhalb der Tälchen floss der Starkregen vom 25.06.2016 flächenhaft in Richtung Rhein ab und verursachte am Fuß der Böschung Erosionsschäden. Die Aufnahme zeigt die B9 (Blick nach Süden) am 28.06.2016. Zu diesem Zeitpunkt waren die Lockergesteinsmassen von der Straße bereits beräumt (Foto: A. WEHINGER).

Es würden entsprechend der Simulation alle vier Haupttäler und weitere kleinere Täler im Projektgebiet von massivem Abfluss betroffen sein und dementsprechend würde es auch in allen vier Tälern zu massiver Bachbettersion und dementsprechend zu mobilisiertem Schutt und Schlammmaterial kommen (vgl. Abb. 11). Auch ist außerhalb der Täler ein massiver Oberflächenabfluss entlang des gesamten Böschungsfußes zu erwarten. Tatsächlich ist ein solcher breiter Abfluss auch beim Starkregen am 25.06.2016 aufgetreten (Abb. 13 und Abb. 12, rote Markierung in Bild A).

Dabei muss erwähnt werden, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Szenarios wie 2014 bei Münster als sehr gering einzustufen ist. Dieses Szenario macht allerdings deutlich, dass eine vorbeugende Schutzmöglichkeit vor Murgängen bei solchen Wassermengen vermutlich kaum möglich ist.

3.6.3 Variation der Landnutzung

Zur Prüfung des Einflusses von Änderungen der Landnutzung auf den Oberflächenwasserabfluss wurde auf der Hochfläche oberhalb des Mittelrheintals das Vorhandensein eines Waldes angenommen. Waldflächen weisen im Vergleich zu Wiesenflächen eine deutlich höhere Oberflächenrauigkeit auf. Durch die Implementation von dieser Waldfläche vor den Einläufen in

die Täler der Steillage wurde in der Simulation eine deutliche Verringerung des Abflusses pro Zeitschritt in den Ereignistälern erreicht (Abb. 14, gegenüberliegende Seite). Einhergehend mit dieser Abflussreduzierung ist auch die Verringerung der Gefahr für das Auftreten von Murenergebnissen in diesen Tälern zu sehen (Abb. 11).

Der Versuch, diese Ergebnisse auch bei einer Verringerung und Aufteilung der Waldfläche in kleinere unabhängig voneinander angeordnete Gebiete zu erzielen, wurde jedoch nicht von der Simulation bestätigt. Es muss also davon ausgegangen werden, dass für eine effektive Reduktion des Abflusses die Größe und räumliche Verteilung einer solchen Waldfläche entscheidend ist. Eine generelle Empfehlung der Landnutzungsänderung hin zu Waldbepflanzung in den oberen Teilen der Einzugsgebiete lässt sich an dieser Stelle jedoch noch nicht ableiten. Dies müsste den lokalen Gegebenheiten entsprechend genauer analysiert und an weiteren Gebieten validiert werden.

3.6.4 Variation des Geländemodells

Die dritte Form der Variation der Eingangsparameter des Modells wurde in Form der lokalen Veränderung des digitalen Geländemodells vollzogen. Hierbei wurden mittels der Höhenanpassung von kleineren Bereichen auf der Hochfläche künstliche Barrieren und Kanäle erschaffen, die in der Simulation die Abflussrichtung des Wassers beeinflussen und somit einen Teil des Wassers aus den Ereignistälern herausleiten sollten. Diese Bearbeitung ist im Vergleich zu den vorhergehenden Variationen deutlich komplexer, sodass dies im Rahmen dieser Studie nur in Ansätzen geleistet werden konnte.

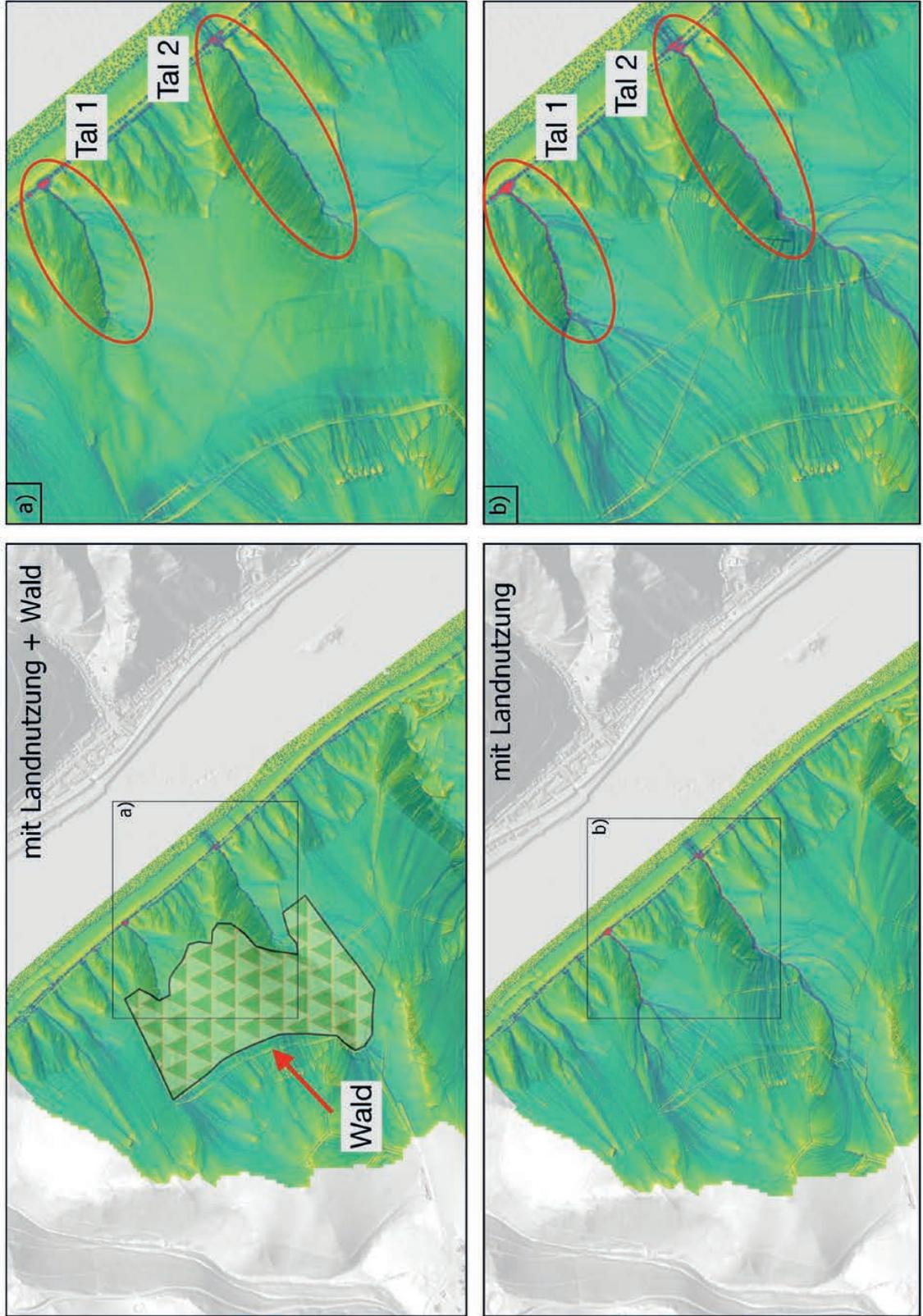
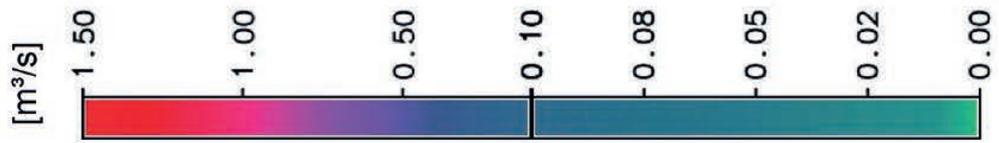
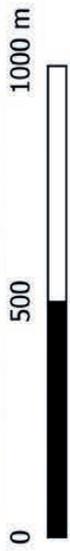
So liegen die Abflussbahnen auch auf der Hochfläche bereits in morphologischen Tiefenlinien, sodass es schwierig ist, das Wasser entgegen dem Gefälle durch eine weitere Vertiefung aus diesen herauszuleiten. Es wurde eine Konstruktion aus einem Meter hohen Mauern und ebenso tiefen Kanälen gewählt. Diese Abflussumleitung hatte in der Simulation zum Teil den gewünschten Effekt. In den beiden Ereignistälern kann es daraufhin zu deutlich verringerten Abflusswerten im Vergleich zur Ausgangssituation (Abb. 15, S. 26).

Es ist unbedingt zu berücksichtigen, dass bei einer effektiven Reduzierung des Wassers aus den beiden Ereignistälern ein Oberflächenabfluss in andere Bereiche resultiert. Je nach Geländesituation kann hierdurch nicht in jedem Fall die Gefahr einer Mure gebannt werden, da sich der Abfluss nur örtlich verlagert. Allerdings ist dieser Ansatz dennoch weiter zu verfolgen, da das Risiko bzw. die Vulnerabilität auch von der Geländenutzung (Bebauung, Infrastruktur) abhängt. Das heißt, dass die Folgen eines Murgangs mit zu berücksichtigen sind und daher eine „Umleitung“ der Wassermassen in Bereiche mit weniger kritischer Nutzung im Einzelfall sinnvoll sein kann.

Abb. 14 (gegenüberliegende Seite): Vergleich der Simulation des Oberflächenabflusses nach 5 Minuten Starkregen mit Änderung der Landnutzung: Das Bild links oben zeigt das veränderte Modell mit implementiertem Wald. Die Bilder rechts zeigen Vergrößerungen der Ergebnisse des simulierten Oberflächenwasserabflusses. Mit dem veränderten Abfluss (rechts oben) resultieren im Vergleich zur vorhandenen Nutzung (rechts unten) geringere Abflüsse in die Täler (1) und (2).



Auswirkung von Wald auf der Hochfläche im Bezug auf den Abfluss nach 5 Minuten



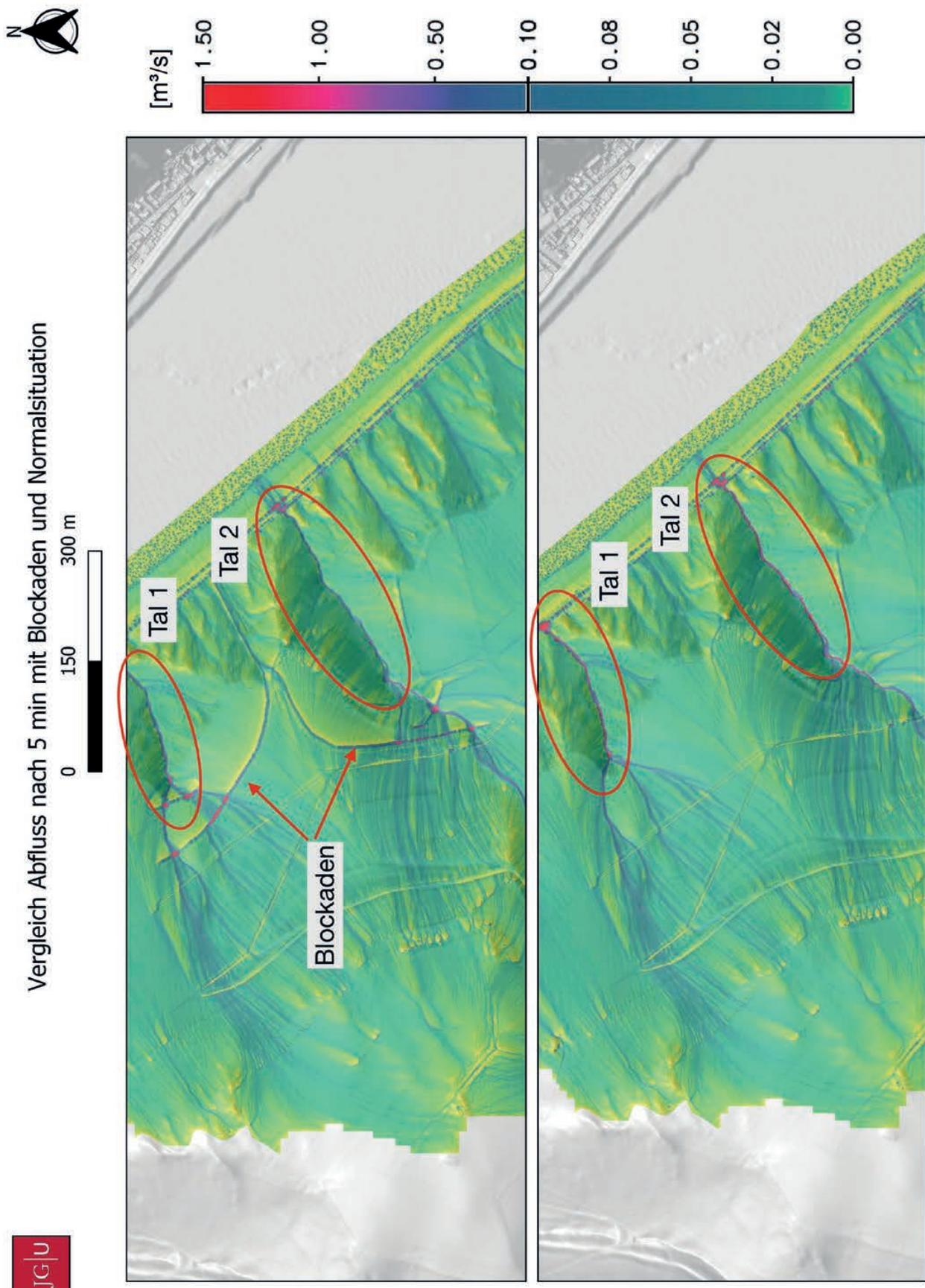


Abb. 15: Vergleich der Simulation des Oberflächenabflusses nach 5 Minuten Starkregen mit Änderung des Geländemodells: Das Bild oben zeigt das veränderte Modell mit Implementierung von zwei sichelförmigen Blockaden (Kanäle und Mauern). Mit dem veränderten Abfluss (oben) resultieren im Vergleich zum vorhandenen Gelände (unten) geringere Abflüsse in die Täler (1) und (2).

4. Murenpotentialkarte

Für die Erstellung einer solchen Karte für das Projektgebiet Henschhausen wurde für die einzelnen im Projektgebiet befindlichen Wassereinzugsgebiete eine Einschätzung entsprechend der Simulation mit Landnutzung und Bodendaten im Vergleich mit den vorgestellten Berechnungen durchgeführt. Dabei wurden die simulierten Werte an die minimal kritischen Oberflächenabflusswerte für die Entstehung eines Murgangs in den einzelnen, dem Abfluss dienenden Gerinnen mit einer beschriebenen Fehlertoleranz von $\pm 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ angeglichen. Auf dieser Grundlage wurde eine Abstufung in weiteren Schritten von $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ vorgenommen (Tab. 1).

Tab. 1: Abstufung des Murenpotentials von Gerinnen für das Projektgebiet. Die Abgrenzung der einzelnen Stufen wurde an den theoretisch berechneten minimal nötigen Abflusswert von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ angepasst.

Wert	$\geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$	$\leq 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$	$\leq 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$	$\leq 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$
Potential	Hoch	Mittel	Gering	Sehr gering

Übertragen auf die einzelnen Einzugsgebiete ergibt sich eine Murenpotentialkarte für Starkregenereignisse größer als 55 mm/h Niederschlag (Abb. 16). Das Tal (3) (Grube Rhein) stellt ein Sonderfall dar, da hier die natürlichen Abflussverhältnisse sowohl durch die frühere Dachschiefer-Gewinnung untertage als auch den aktuellen Tagebau massiv verändert wurden. Dieser Fall zeigt auch exemplarisch, dass eine genaue Betrachtung der lokalen Gegebenheiten zwingend ist.

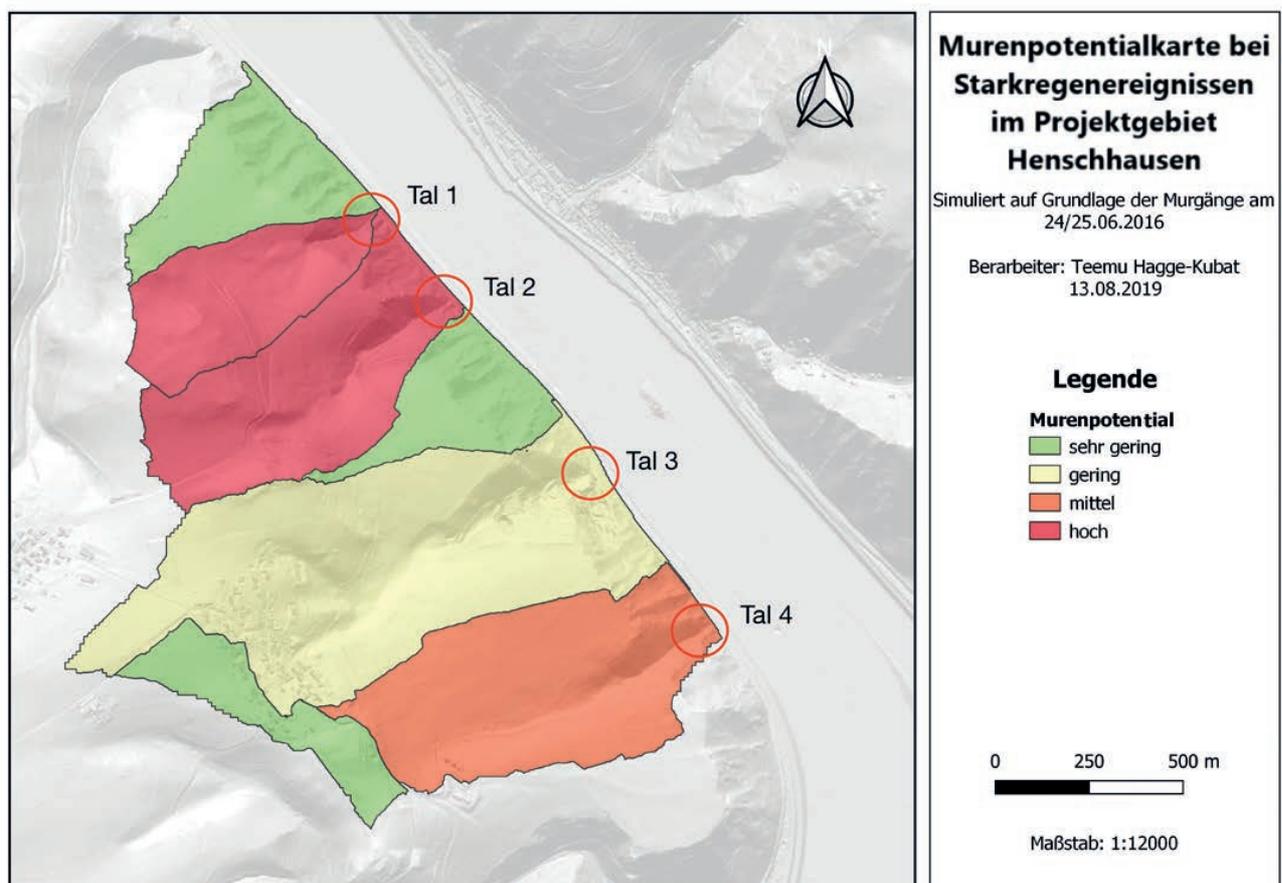


Abb. 16: Murenpotentialkarte des Projektgebietes Henschhausen. Die dargestellten Flächen entsprechen den oberirdischen Wassereinzugsgebieten. Die Karte berücksichtigt die vorhandene Landnutzung sowie die Bodendaten.

5. Fazit

Zurzeit sind etablierte Methoden zur Untersuchung von Muren im Mittelrheintal mittels geographischer Informationssysteme nur begrenzt nutzbar (REISCHL 2017). Fernerkundliche Methoden zur Erkundung der Anrisszone, der räumlichen Verteilung der Lockergesteinsdecken oder Ähnlichem sind durch die dichte Vegetation in den Steillagen kaum einsetzbar. Vorhandene Murgangssimulationsprogramme wie RAMMS, dfwalk oder Flow-R sind eher für den Gebrauch im alpinen Raum ausgelegt und entsprechen nicht hinreichend den Anforderungen für eine Gefahrenzonierung für das Obere Mittelrheintal und sein spezifisches Murgangsmilieu (WERNER 2018).

Das hier entwickelte und getestete System, bestehend aus Programmen und Komponenten von QGIS, SAGA und GRASS GIS, hat in Bezug auf die Detektion von Gefährdungsgebieten von Murgängen in Folge von Starkregenereignissen plausible Ergebnisse geliefert. Dieses System stellt keine klassische kinetische Murgangssimulation dar, wie sie für das Mittelrheintal bei WERNER (2018) beschrieben wird, in der die Geschiebebewegungen eines Murgangs vom Anrisspunkt zum Ablagerungsort simuliert werden können. Vielmehr wird mit diesem Ansatz über die Ermittlung des tatsächlichen Oberflächenabflusses bei Starkregenereignissen mit bestimmten Niederschlagsmengen die Gefahr der Auslösung eines Murgangs durch progressive Sohlerosion geprüft. Wie herausgearbeitet werden konnte, werden durch die Implementation der Landnutzung und der Bodenverhältnisse die Simulationen deutlich präziser und entsprechen prinzipiell den realen Verhältnissen.

Mithilfe einer Verschneidung dieser simulierten Werte mit den manuell errechneten minimalkritischen Abflusswerten für die Entstehung eines Murgangs nach der Formel von TOGNACCA (1999) konnte für jedes relevante Gerinne eine theoretische Einschätzung des Murgangspotentials bei Starkregenereignissen erstellt werden.

Um einerseits die Möglichkeiten der Module auszutesten und andererseits eine Sensibilisierung für verschiedene mögliche Szenarien zu schaffen, wurden zusätzlich verschiedene Vorwärtssimulationen durchgeführt. Dabei wurden Inputparameter markant verändert, um die jeweilige Wirkung auf die Abflussentwicklung für das Projektgebiet zu ermitteln. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass eine veränderte Landnutzung – z.B. Wald auf der Hochfläche – eine Abflussreduzierung in den Gerinnen in der Steillage bewirkt. Ebenfalls konnte durch eine Veränderung des digitalen Geländemodells und damit der einer Berechnung zugrundeliegenden Topographie eine Verringerung der Abflusswirkung erzielt werden. In beiden Fällen unterschreiten die simulierten Werte daraufhin die jeweiligen minimal kritischen Werte für eine Murgangsentstehung in den betreffenden Gerinnen. Bei der Simulation extremen Starkniederschlags (Typ „Münster 2014“) wurde in dem Projektgebiet in allen Gerinnen massiver Abfluss simuliert. Hierbei werden die nach TOGNACCA (1999) berechneten Werte überschritten. Dieses Ergebnis zeigt, dass für solche Extremereignisse in der Praxis verschiedene Ansätze im Umgang mit Starkregen, wie Maßnahmen der Reduzierung des Oberflächenabflusses und Maßnahmen des Katastrophenschutzes wie Monitoring- und Verkehrsregelungssysteme zu kombinieren sind.

Abschließend sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass Simulationsrechnungen zur Abschätzung von Prozessen in der Natur zwar eine große und oft nicht ersetzbare Bedeutung haben, sie aber lediglich eine vereinfachte Abbildung dieser natürlichen Prozesse ermöglichen. Eine konkrete Betrachtung der realen Naturverhältnisse durch Untersuchungen und Kartierungen im Gelände sowie die Bearbeitung von Schadensereignissen ist deshalb unerlässlich.

6. Ausblick

Die hier vorgestellten Methoden sind weiterzuentwickeln und zu validieren. Ziel hierbei ist die Entwicklung eines mehrstufigen Analysesystems, um durch Murgang gefährdete Gebiete in Mittelgebirgslagen systematisch zu identifizieren, nach Gefährdungslagen zu kategorisieren und mögliche Präventionsmaßnahmen zu prüfen bzw. vorzuschlagen. Ein Schema zum Inhalt und Ablauf des mehrstufigen Analysesystems ist in Abb. 17 dargestellt:

Stufe 1

- **Ansatz:** Regionale Analysen potentieller Gefährdungsgebiete, u.a. mit Ermittlung geomorphologischer Parameter, oberirdischer Wassereinzugsgebiete sowie GIS-gestützte Ableitungen von Lockergesteinsverteilungen und deren Eigenschaften (ingenieurgeologische Klassen).
- **Ziel:** Abschätzung der Suszeptibilität (Empfindlichkeit) gegenüber Murgängen und ggfs. anderen Massenbewegungen im regionalen Maßstab zur Vorauswahl von Flächen.



Stufe 2

- **Ansatz:** Lokale Analysen mit Anwendung der in dieser Arbeit aufgezeigten und weiterentwickelten Simulationen für die Flächen der Vorauswahl (Ergebnis Stufe 1) einschließlich deren Validierung (z.B. Ground Checks). Zur Weiterentwicklung ist die Implementierung zusätzlicher Daten, wie zum Untergrund (z.B. geotechnische Eigenschaften) oder Fernerkundungsdaten (z.B. Sentinel-Daten), zu prüfen.
- **Ziel:** Anfertigung von Murgangpotentialkarten bzw. Gefahren(hinweis)karten.



Stufe 3

- **Ansatz:** Durchführen von physischen Vulnerabilitätsanalysen für kritische Infrastrukturen (Bebauung, Verkehrswege u.a.), die durch Murgänge gefährdet sind (Ergebnis Stufe 2). Auf Basis dieser Analysen sind Flächen mit Handlungsbedarf zu priorisieren.
- **Ziel:** Für prioritäre Flächen sind Präventions- und/oder Schutzmaßnahmen zu prüfen und vorzuschlagen.

Abb. 17: Schema zum Inhalt und Ablauf eines mehrstufigen Analysesystems zur Detektion und zum Umgang mit Flächen, die durch Murgänge gefährdet sind.

Zusammenfassend hat die genannte stufenweise Herangehensweise das Ziel, besonders vulnerable Gebiete zu identifizieren, um dort gezielt im Voraus Maßnahmen durchführen zu können. Dies entspricht dem Prinzip einer echten Prävention. Bei erfolgreicher Umsetzung wären durch die Vermeidung oder Minderung von Schäden durch Starkregen enorme Kosteneinsparungen zu erwarten (siehe Kapitel 1).

Schriften

- ALBERTI, M., WEHINGER, A. & KRAUTER, E. (2013): Hang- und Felssicherungsmaßnahmen in der Welterbergregion Oberes Mittelrheintal. Geländeexkursion am 13.06.2013. – Forschungsstelle Rutschungen an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (Hrsg.): 13. Weiterbildungsseminar Rutschungen: 39-42; Mainz.
- BECKER, P., BECKER, A., DALELANE, C., DEUTSCHLÄNDER, T., JUNGHÄNEL, T., & WALTER, A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland – Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Internet: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.html. – Deutscher Wetterdienst; Offenbach am Main.
- BUNZA, G., PLONER, A. & SÖNSER, T. (2004): Die Modellierung des Abfluss- und Feststofftransportes in Wildbächen für die Beurteilung und Planung von Schutzmaßnahmen dargestellt am Beispiel des Lainbach bei Benediktbeuern, Bayern. – Internationales Symposium Interpraevent 2004 Trient: 83-92; Trient.
- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V. & BÖHNER, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. – Geoscientific Model Development, **8**: 1991-2007.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2019): Climate data Center (DWD-CDC). Internet: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>.
- ENZMANN, F., WERNER, A. & KERSTEN, M. (2019): MABEIS – Ein Massenbewegungs-Informationssystem für Rheinland-Pfalz. Akuteller Stand der Entwicklung. – Forschungsstelle Rutschungen an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (Hrsg.): 19. Weiterbildungsseminar - Fachtagung Rutschungen: 18-22; Mainz.
- ERHARDT, G. (2007): Numerische Lösung der Flachwassergleichung mit Hilfe der Methode der Finiten Massen. – Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München, 85 S.; München.
- GRAF, C., DEUBELBEISS, Y., BÜHLER, Y., MEIER, L., McARDELL, B., CHRISTEN, M., & BARTELT, P. (2013): Gefahrenkartierung Mattertal: Grundlagenbeschaffung und numerische Modellierung von Murgängen. Mattertal – ein Tal in Bewegung. – Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, **29**: 85-112; St. Niklaus.
- HAAN, C., BARFIELD, B. & HAYES, J. (1994): Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. – 608 S., Elsevier/Academic Press Inc; San Diego.
- HAGGE-KUBAT, T. (2019): Abfluss- & Sedimenttransportsimulation von Starkregenereignissen am Oberen Mittelrheintal. – Masterarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz; Mainz. – [unveröff.].
- KEEFER, D. K., WILSON, R.C., MARK, R.K., BRABB, E.E., BROWN, W., ELLEN, S., HARP, E., WIECZOREK, G., ALGER, C. & ZATKIN, R.S. (1987): Real-time landslide warning during heavy rainfall. – Science, **238**(4829): 921-925; Washington D.C.
- KIRCHHOFF, R. (2016): Entgleisung 2016-06-25. – Internet: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Entgleisung_2016-06-25_IMG_6547.jpg
- KIRNBAUER, R. (2002): Niederschlag-Abfluss-Simulation für Gefahrenzonenpläne-Fallstudie Schesatobel bei Bludenz. – Wiener Mitteilungen, **164**: 19-30; Wien.
- MITASOVA, H., BARTON, M., ULLAH, I., HOFIERKA, J., & HARMON, R. S. (2013): GIS-based soil erosion modeling. - Treatise on geomorphology, Elsevier Inc, **3**: 228-258; Amsterdam.
- MITASOVA, H. & MITAS, L. (2001): Multiscale soil erosion simulations for land use management. In: Harmon, S. & Doell, W. (2009): Landscape Erosion and Evolution Modeling. – Landscape Erosion and Evolution Modeling: 321-347. New York.

- MITASOVA, H., THAXTON, C., HOFIERKA, J., McLAUGHLIN, R., MOORE, A., & MITAS, L. (2004): Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. – *Developments in Water Science*, **55**: 1479-1490; Amsterdam.
- NETELER, M., BOWMAN, M.H., LANDA, M., METZ, M., (2012): GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. - *Environmental Modelling & Software*, **31**: 124–130; Amsterdam.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2020): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Internet: <http://qgis.osgeo.org>
- REISCHL, C. (2017): Charakterisierung der Einzugsgebiete von Murgängen im Oberen Mittelrheintal. – Masterarbeit an der RWTH Aachen; Aachen. - [unveröff.].
- STAFFLER, H., POLLINGER, R. & ZISCHG, A. (2008): Priorisierung des Handlungsbedarfs bei der Sicherung des Lebensraumes vor Wassergefahren auf regionaler Maßstabsebene in der autonomen Provinz Bozen Süd-Tirol. – *Internationales Symposium Interpraevent 2008*, **2**: 323-334; Dorbrin.
- TAKAHASHI, T. (1981): Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: Soft countermeasures for a disaster. – *Natural disaster science*, **3(1)**: 57-89.
- TOGNACCA, C. (1999): Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. – Dissertation an der ETH Zürich, 259 S.; Zürich.
- TYRNA, B.G., & HOCHSCHILDT, V. (2010): Modellierung von lokalen Überschwemmungen nach Starkniederschlägen. – Universität Salzburg (Hrsg.): *Agit – Journal für Angewandte Geoinformatik*, **22**: 325-334; Salzburg.
- WERNER, A. (2018): Simulation von Muren im Oberen Mittelrheintal mittels Flow-R. – Masterarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz; Mainz. – [unveröff.].
- WHITTAKER, J.G., & JÄGGI, M.N.M. (1986). Blockschwellen. – *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, Glaziologie der ETH Zürich*, **91**: 187 S.; Zürich.

Manuskript eingegangen am 22.4.2020

Anschriften der Autoren

TEEMU HAGGE-KUBAT
Geographisches Institut
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Johann-Joachim-Becher-Weg 21
D-55128 Mainz
E-Mail: hagge-kubat@uni-mainz.de

ANSGAR WEHINGER
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Emy-Roeder-Straße 5
D-55129 Mainz
E-Mail: ansgar.wehinger@lgb-rlp.de

PROF. DR. FRIEDER ENZMANN
Institut für Geowissenschaften
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Johann-Joachim-Becher-Weg 21
D-55128 Mainz
E-Mail: enzmänn@uni-mainz.de